

Um estudo do comportamento dos tornozelos durante a locomoção humana e simulação por meio de osciladores

Armando Carlos de Pina Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEU/POLI/UFRJ, e-mail: armando@poli.ufrj.br, home-page: <http://www.deg.ee.ufrj.br/docentes/armando.html>

Introdução

O estudo de mecanismos que realizam funções motoras, como braços e pernas, tem por objetivo o projeto de robôs autônomos e aplicação na reabilitação de pessoas que tenham sofrido algum acidente. O estudo da locomoção está inserido neste contexto, e tem sido intensivamente estudada desde a segunda metade do século XX.

Apesar do grande número de pesquisas nesta área, em geral os estudos apresentam a modelagem do movimento de quadris e joelhos, sendo que o tornozelo foi pouco explorado, em grande parte devido à dificuldade de padronização de seu movimento durante a locomoção.

O trabalho aqui apresentado tem como objetivo verificar o comportamento dos tornozelos durante o ciclo de locomoção humana, avaliando suas principais características, chegando a um padrão de movimento para os mesmos, e a partir da utilização de osciladores, simular o comportamento dos tornozelos.

Características do tornozelo

O tornozelo é formado pela união de três ossos: tibia, fíbula e tálus, possuindo também três articulações: subtalar, tibiofibular e talocrural, e vários ligamentos, estes responsáveis pela estabilidade do tornozelo. A Figura 1 apresenta uma vista frontal do tornozelo indicando os principais elementos que formam sua estrutura.

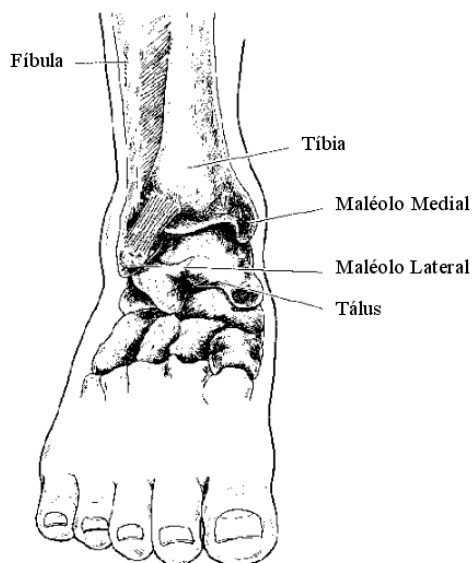


Figura 1: Tornozelo humano.

Segundo Bates e Hanson (1996), os maléolos medial e lateral e os fortes ligamentos colaterais estabilizam a articulação permitindo pouco ou nenhum movimento lateral. Para Lehmkuhl e Smith (1989), o maléolo

lateral projeta-se mais distalmente do que o medial. Assim, o movimento lateral do tornozelo é mais limitado do que o movimento medial. Isso caracteriza um determinado eixo de movimentação do tornozelo.

De acordo com Rosa Filho (2001), os movimentos envolvidos na articulação do tornozelo são: a flexão plantar, a flexão dorsal, a inversão, e a eversão. A flexão plantar é o movimento pelo qual a planta do pé é voltada para o chão; a flexão dorsal é o movimento no qual o dorso do pé é voltado para a cabeça; a inversão é o movimento no qual se vira a planta do pé para a perna; e a eversão é o movimento no qual se vira a planta do pé para a parte lateral da perna.

Neste trabalho o interesse está relacionado aos movimentos de flexão e extensão do tornozelo, os quais estão ligados ao eixo de movimentação definido na Figura 2.



Figura 2: Eixo de movimento do tornozelo.

Locomoção humana

O ciclo normal de locomoção pode ser dividido em duas fases: a fase de suporte simples, na qual uma das pernas realiza o movimento de balanço enquanto a outra é responsável pelo apoio; e a fase de suporte duplo, onde ocorre a transição das pernas, ou seja, a perna em balanço torna-se perna de apoio e a outra se apronta para iniciar o balanço.

A articulação entre o tornozelo e o pé tem fundamental importância na sustentação do corpo e na locomoção. Para Kisner e Colby (1992), o tornozelo e o pé são estruturas inter-relacionadas que possuem sincronismo anatômico e funcional, permitindo o apoio, a sustentação e a deambulação. Lehmkuhl e Smith (1989) afirmam que a postura do pé e tornozelo podem mudar em um único passo de uma estrutura flexível que se conforma às irregularidades do solo para uma estrutura rígida de sustentação de peso.

O comportamento dos tornozelos, assim como das demais partes do locomotor, pode ser mapeado através de gráficos durante o ciclo de locomoção, como será visto a seguir.

Comportamento dos tornozelos

O comportamento dos tornozelos durante um ciclo de locomoção pode ser determinado experimentalmente através de testes, como por exemplo, a partir da utilização de um sistema óptico-eletrônico de análise cinemática tridimensional (Raptopoulos, 2003). É feita uma verificação do ângulo referente à movimentação de extensão e flexão do tornozelo, durante o ciclo de locomoção de cada voluntário.

Uma padronização do movimento é bastante difícil, visto que algumas respostas são bem diferentes, mas considerando todos os dados é possível especificar uma curva padrão referente ao comportamento dos tornozelos durante o ciclo de locomoção. Essa curva pode ser vista na Figura 3, onde a linha cheia representa a média dos valores, enquanto as linhas tracejadas representam os valores extremos, caracterizando assim um padrão de comportamento dos tornozelos.

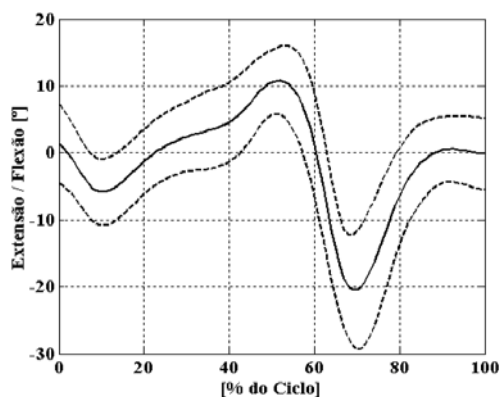


Figura 3: Comportamento dos tornozelos.

Simulação por meio de osciladores

Um dos osciladores mais conhecido e utilizado em diversos trabalhos sobre locomoção é o oscilador de van der Pol. A equação de van der Pol que será usada neste trabalho para análise é da forma:

$$\ddot{x} - \varepsilon(1 - p(x - x_0)^2)\dot{x} + \Omega^2(x - x_0) = 0 \quad \varepsilon, p \geq 0 \quad (1)$$

onde ε , p e Ω são os parâmetros do oscilador.

Dessa forma, considerando θ como sendo o ângulo do tornozelo, tem-se:

$$\ddot{\theta} - \varepsilon[1 - p(\theta - \theta_0)^2]\dot{\theta} + \Omega^2(\theta - \theta_0) = 0 \quad (2)$$

Para pequenos valores de parâmetros que determinam a não-linearidade do oscilador, pode-se supor a seguinte solução periódica aproximada:

$$\theta = \theta_0 + A \cos(4\omega t + \alpha) \quad (3)$$

Derivando-se a eq. (3), com α igual a zero, e substituindo os resultados na eq. (2), pela aplicação do método de balanço harmônico (Nayfeh e Mook, 1979), pode-se determinar os valores dos parâmetros p e Ω .

Adotando-se $\varepsilon = 0,1$ e $\omega = 1 \text{ s}^{-1}$, assim como os valores iniciais fornecidos pela Tabela 1, e usando o

MATLAB, foi gerado o gráfico mostrado na Figura 4, que apresenta o comportamento do ângulo do tornozelo em função do tempo.

Tabela 1: Valores iniciais experimentais.

Ciclo	$0 < \omega t \leq \pi/2$	$\pi/2 < \omega t \leq \pi$	$\pi < \omega t \leq 3\pi/2$	$3\pi/2 < \omega t \leq 2\pi$
A	3	-1	-4	11
θ_0	-2	2	5	-10

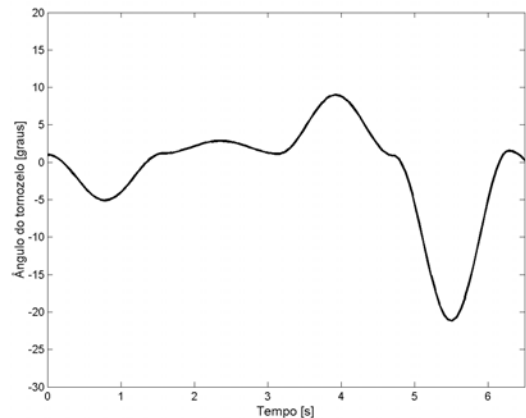


Figura 4: Ângulo do tornozelo em função do tempo.

Comparando o resultado fornecido pelo oscilador de van der Pol com aquele apresentado na Figura 3, verificou-se que o oscilador forneceu resultado bem similar, o que comprova a possibilidade de utilização do mesmo na modelagem do tornozelo.

Comentários finais

Neste trabalho foram apresentadas características do tornozelo humano, levando em consideração fatores referentes à anatomia e cinesiologia, especificando-se então o padrão de comportamento dos tornozelos durante o ciclo de locomoção.

Com este padrão foi possível simular o comportamento do tornozelo usando osciladores, de forma similar ao feito por Pina Filho (2005) com quadril e joelhos. Os ângulos dos tornozelos devem ser sincronizados para que o movimento de locomoção seja fluente.

Referências bibliográficas

- Bates A.; Hanson N., Aquatic Exercise Therapy, Philadelphia. W.B. Saunders & Company, 1996
- Kisner, C.; Colby, L.A., Exercícios Terapêuticos, Ed. Manole, São Paulo, 1992
- Lehmkuhl, L.D.; Smith, L.K., Interação dos fatores mecânicos e fisiológicos na função, In: Brunstroms Cinesiologia Clínica, Ed. 4, Philadelphia, 1989
- Nayfeh, A.H.; Mook, D.T., Nonlinear oscillations, John Wiley & Sons, Inc., 1979
- Pina Filho, A.C.de, Study of Mutually Coupled Nonlinear Oscillators Applied in the Locomotion of a Bipedal Robot, D.Sc. Tese, COPPE/UFRJ, Brasil, 2005
- Raptopoulos, L.S.C., Estudo de Equipamento de Baixo Custo para Análise da Marcha de Amputados, D.Sc. Tese, COPPE/UFRJ, 2003
- Rosa Filho, B.J., www.wgate.com.br/fisioweb, World Gate Brasil Ltda, 2001